

# 高地应力条件下隧洞开挖诱发围岩振动特征研究

卢文波, 陈明, 严鹏, 周创兵

(武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** 采用理论分析、动力有限元数值模拟和振动监测数据对比等综合方法, 研究高地应力条件下隧洞钻爆开挖诱发围岩振动的特征。发现高地应力条件下深埋隧洞钻爆开挖诱发的围岩振动由爆破振动和岩体初始地应力(开挖荷载)动态卸载诱发振动两部分叠加而成。在低岩体初始应力条件下, 隧洞钻爆开挖过程围岩振动主要由爆炸荷载所引起; 高地应力条件下, 开挖荷载瞬态卸荷诱发振动的幅值可超过爆破振动而成为围岩振动的主要因素。利用四川省瀑布沟水电站引水隧洞进口段(地应力水平 10 MPa)和尾水隧洞洞身段(地应力水平 20 MPa)钻爆开挖过程的实测围岩振动资料, 对理论分析和数值模拟结果进行验证。

**关键词:** 隧道工程; 高地应力; 开挖; 瞬态卸荷; 诱发振动

**中图分类号:** U 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2007)增 1 - 3329 - 06

## STUDY ON VIBRATION CHARACTERISTICS OF SURROUNDING ROCK INDUCED BY TUNNEL EXCAVATION UNDER HIGH IN-SITU STRESS

LU Wenbo, CHEN Ming, YAN Peng, ZHOU Chuangbing

(State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China)

**Abstract:** The vibration characteristics of surrounding rock induced by the excavation of tunnel under high in-situ stress are studied with combined method of theoretical analysis, numerical simulation by dynamic finite element method(FEM) and verification with monitored field vibration data. It is found that the vibration induced by the excavation of tunnel under high in-situ stress is the result of superposition of blasting-induced vibration(BIV) and the transient unloading of in-situ stress induced vibration(DUIV). The study reveals that, under low in-situ stress condition, the vibration in surrounding rock is mostly induced by blasting load. Under high in-situ stress condition, the DUIV could become absolutely the main factor of total seismic wave induced by the excavation of tunnel with method of drilling and blasting. In the end, monitored vibration induced by the excavation of tail-water and inlet water tunnel in Pubugou Hydropower Station, Shichuan Province, China, is presented as a verification, which is corresponding to in-situ stresses of 10 and 20 MPa, respectively.

**Key words:** tunneling engineering; high in-situ stress; excavation; transient unloading; induced vibration

## 1 引言

在采矿、水电工程和核废料储存库修建中, 岩

石钻爆开挖过程诱发的岩体振动是影响地下洞室围岩或边坡岩体稳定性的重要因素。地下洞室钻爆开挖诱发的振动通常指爆炸荷载诱发的围岩振动。但是, 采矿和岩爆诱发微地震等现象表明, 伴随岩体

**收稿日期:** 2007 - 04 - 23; **修回日期:** 2007 - 05 - 28

**基金项目:** 国家自然科学基金委、雅砻江水电开发联合基金资助项目(50639100, 50539100); 教育部新世纪优秀人才计划项目

**作者简介:** 卢文波(1968 -), 男, 博士, 1990年毕业于武汉大学水利水电工程专业, 现任教授、博士生导师, 主要从事岩石动力学及工程爆破方面的教学与研究工作。E-mail: wblu@whu.edu.cn

开挖而发生的岩体开挖荷载的瞬态卸荷可能是诱发围岩振动的另外一个因素<sup>[1~6]</sup>。

以往研究中, 岩体的开挖卸荷一般作为准静态过程处理, 但是国内外的相关研究成果<sup>[7~11]</sup>均表明, 在高地应力条件下, 开挖荷载的卸荷需考虑动态效应。M. A. Cook 等<sup>[7]</sup>发现, 岩体开挖过程的岩体应力突然释放可导致岩石的超松弛, 并在岩体中产生拉应力; M. G. Abuov 等<sup>[8]</sup>的工作也表明, 岩体爆破过程中, 岩体应力的快速释放可引起开挖面附近岩体的损伤; J. P. Carter 和 J. R. Booker<sup>[9]</sup>则通过理论分析证明, 隧洞的瞬间开挖可在围岩中激起应力波, 并且拉应力波的强度随卸荷速率的提高而增大。卢文波等<sup>[10, 11]</sup>的初步研究也表明, 高地应力条件下开挖荷载瞬态卸荷诱发的振动可能占到围岩总体振动响应的很大部分。

本文采用理论分析、动力有限元数值模拟和实测振动资料对比等综合方法, 研究高地应力条件下隧洞钻爆开挖诱发围岩振动特征。

## 2 理论分析

### 2.1 爆破荷载和开挖荷载的确定

为简化分析过程, 取研究对象为直径为 10 m 的圆形隧洞, 采用全断面钻爆方法开挖。隧洞围岩为密度为 2 700 kg/m<sup>3</sup>、弹性模量为 64.2 GPa、泊松比为 0.23、纵波速度为 5 250 m/s 的花岗岩。

隧洞全断面钻爆开挖的爆破设计见图 1, 采用中间直孔掏槽。炮孔直径为 42 mm, 装药为密度 1 000 kg/m<sup>3</sup>、爆速 3 400 m/s 的乳化炸药。由里往外, 开挖掌子面上依次布置了 2 圈掏槽孔、3 圈崩落孔、

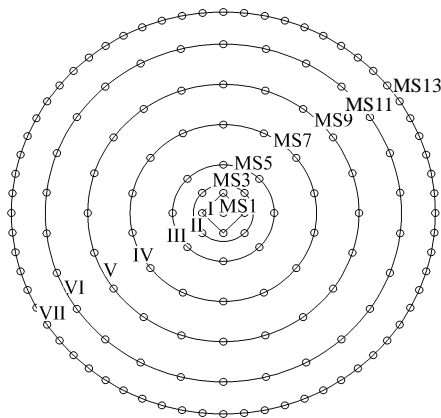


图 1 圆形隧洞开挖爆破设计示意图

Fig.1 Sketch of blasting design for excavation of a circular tunnel

1 圈缓冲孔和周边光面爆破孔, 分别采用段别为 MS1, MS3, MS5, MS7, MS9, MS11 和 MS13 的毫秒非电雷管起爆。

### 2.2 爆炸荷载

分析过程中采用了如图 2 所示的三角形爆炸荷载, 其中  $t_r$  和  $t_d$  分别为荷载上升时间和正压作用时间。

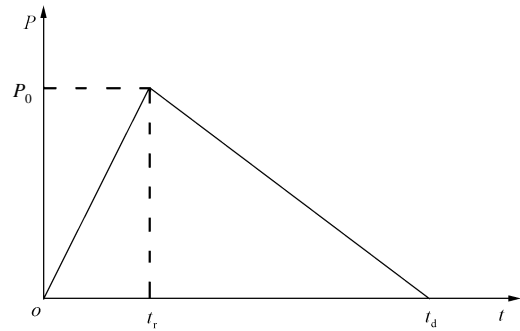


图 2 采用的爆破荷载

Fig.2 Adopted blasting load

在绝热等熵假设下, 炮孔内爆轰气体的初始平均爆炸压力可按照装药耦合条件分别由下两式计算。

耦合装药:

$$P_0 = \frac{\rho_e D_e^2}{2(\gamma + 1)} \tag{1}$$

式中:  $P_0$  为炮孔内的平均初始爆轰气体压力;  $\rho_e$  为炸药密度;  $D_e$  为炸药爆轰速度;  $\gamma$  为炸药的等熵指数, 对乳化炸药,  $\gamma$  取 3.0。

不耦合装药:

$$P_0 = \frac{\rho_e D_e^2}{2(\gamma + 1)} \left(\frac{d}{D}\right)^{2\gamma} \tag{2}$$

式中:  $d$  和  $D$  分别为药卷和炮孔的直径。

根据爆破参数及式(1), (2)计算得到的各圈炮孔平均初始爆轰气体压力见表 1。

### 2.3 开挖荷载

与隧洞全断面分段微差起爆顺序对应的岩体分步开挖荷载, 可利用外径为无限大的厚壁圆筒在远场受压条件下的弹性应力公式计算得到:

$$\sigma_r = \left(1 - \frac{r_0^2}{r^2}\right) P_i \tag{3}$$

式中:  $\sigma_r$  为厚壁圆筒的径向应力(开挖荷载),  $r_0$  为圆柱体的内径,  $P_i$  为岩体的远场均匀初始应力。

考虑到开挖掌子面上的炮孔是一圈圈由里往外顺序起爆, 与某一圈炮孔起爆对应的分步开挖荷载

表 1 爆破参数及计算得到的爆炸荷载  
Table 1 Blasting parameters and calculated blasting loads

炮孔顺序	炮孔类型	至隧洞中心距离 $r/m$	炮孔数	间距/ $m$	装药直径/ $mm$	$P_0/MPa$	等效爆炸荷载*/ $MPa$
I	掏槽孔	0.25	4	0.39	42.0	1 445.0	154.5
II	掏槽孔	0.60	4	0.94	42.0	1 445.0	64.4
III	崩落孔	1.20	8	0.94	32.0	282.7	12.6
IV	崩落孔	2.20	14	0.99	32.0	282.7	12.0
V	崩落孔	3.20	20	1.00	32.0	282.7	11.8
VI	缓冲孔	4.20	26	1.02	28.5	141.1	5.8
VII	光面爆破孔	5.00	64	0.49	20.0	43.6	3.7

注：“\*”表示爆炸荷载通过假定炮孔内的爆炸荷载均匀作用在相邻两炮孔的连线上而计算得到。

为前一圈炮孔起爆后在该圈炮孔处形成的二次应力。如图 3 所示, 对第 V 圈炮孔而言, 在其起爆前, 第 I, II, III 和 IV 圈炮孔均已起爆, 并已形成了具有一定内径的圆筒体, 与第 V 圈炮孔对应的开挖荷载即为炮孔所处部位的围岩二次分布应力。计算得到的分步开挖荷载见表 2。

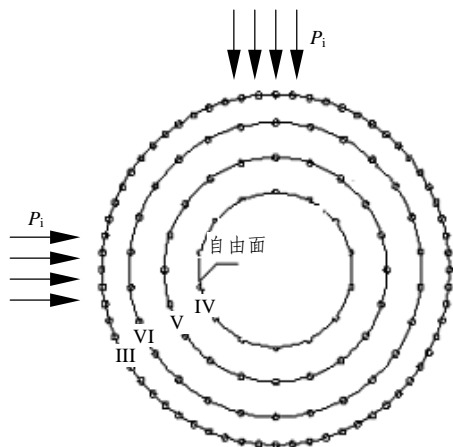


图 3 开挖荷载的确定

Fig.3 Determination of excavation load

表 2 与不同段别微差起爆对应的开挖荷载

Table 2 Excavation loads corresponding to different blast sequences

炮孔顺序	炮孔类型	至隧洞中心距离 $r/m$	开挖荷载/ $MPa$					
			2 MPa	5 MPa	10 MPa	20 MPa	30 MPa	40 MPa
I	掏槽孔	0.25	1.99	4.96	9.93	19.86	29.79	39.72
II	掏槽孔	0.60	1.65	4.13	8.26	16.53	24.79	33.06
III	崩落孔	1.20	1.65	4.13	8.26	16.53	24.79	33.06
IV	崩落孔	2.20	1.40	3.51	7.02	14.05	21.07	28.10
V	崩落孔	3.20	1.05	2.64	5.27	10.55	15.82	21.09
VI	缓冲孔	4.20	0.84	2.10	4.20	8.39	12.59	16.78
VII	光面爆破孔	5.00	0.59	1.47	2.94	5.89	8.83	11.78

在爆炸荷载激发的围岩动力响应计算中, 为减少计算工作量, 近似认为每一段别雷管起爆引起的爆炸荷载均匀作用在炮孔连线上。不同段别雷管起爆引起的等效爆炸荷载见表 2。计算中  $P_0$  取 78 MPa,  $t_r$  和  $t_d$  参考花岗岩内爆炸荷载的类似试验资料, 分别取 0.05 和 0.75 ms<sup>[12]</sup>。

在岩体爆破开挖过程中, 裂纹首先在炮孔连线方向优先扩展。当两炮孔间裂缝面完全贯通, 岩体碎块抛离新形成的开挖面后, 岩体开挖荷载的卸荷过程完成。开挖荷载的卸荷历程曲线取决于卸荷方式及速率。在开挖荷载瞬态卸荷引起的围岩动力响应计算中, 开挖边界上的应力变化曲线近似采用图 4 所示的折线①, 该线是岩体远场应力(线段②)和卸荷曲线③的叠加。

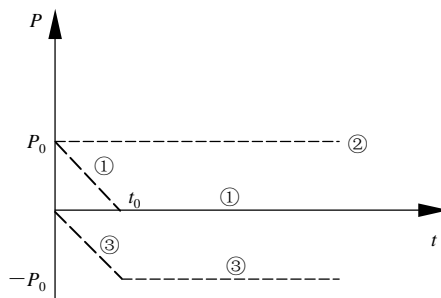


图 4 岩体应力的瞬态卸荷过程

Fig.4 Transient unloading process of surrounding rock stress

岩体应力卸荷总历时  $t_0$  可通过爆炸荷载驱动的裂缝扩展及岩石抛掷过程进行估算。根据爆炸荷载驱动的裂缝扩展实测资料, 其平均扩展速度约为 0.2~0.3 倍的纵波速度<sup>[13~15]</sup>, 本文取为 1 250 m/s。因此针对钻孔直径为 42 mm、孔间距为 0.5~1.0 m、孔深为 3~5 m 的浅孔爆破, 估算  $t_0$  约为 2 ms。

爆炸荷载及开挖荷载瞬态卸荷诱发的围岩动力响应计算采用动力有限元法。

2.4 计算结果

计算得到的爆炸荷载和岩体初始应力为 20 MPa 条件下开挖荷载瞬态卸荷诱发的围岩峰值质点

振动速度(PPV)分别见图 5, 6。

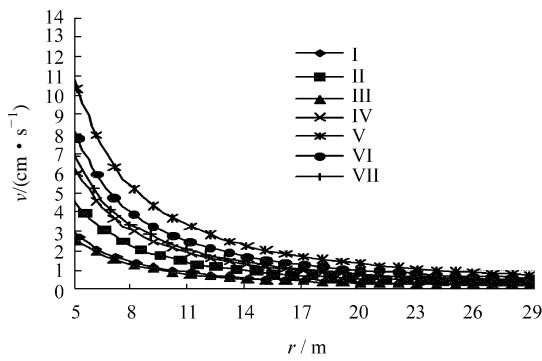


图 5 爆炸荷载诱发的围岩径向 PPV

Fig.5 Attenuations of radial PPV induced by blasting load

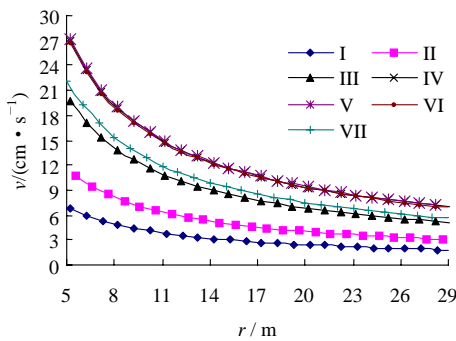


图 6 开挖荷载瞬态卸荷诱发的围岩径向 PPV

Fig.6 Attenuations of radial PPV induced by transient unloading of in-situ stress

根据图 5, 6, 通过爆炸荷载与开挖荷载瞬态卸荷诱发围岩振动最大 PPV 值间的对比, 可定量评价开挖荷载瞬态卸荷的动态效应。

对第 V 圈炮孔, 爆炸荷载和初始应力分别为 20, 10, 5 和 2 MPa 条件下开挖卸荷诱发的 PPV 对比见图 7, 图中 BL 和 IS 分别代表爆炸荷载和岩体开挖荷载瞬态卸荷诱发的振动。

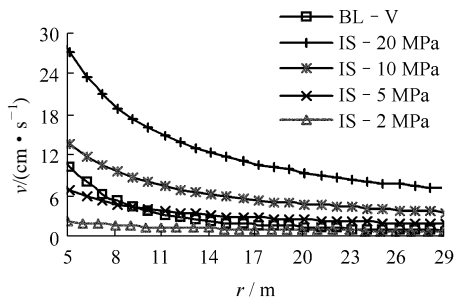


图 7 爆炸荷载和不同初始应力条件下开挖卸荷诱发 PPV 对比

Fig.7 Comparisons of PPV induced by blasting load and transient unloading under different in-situ stresses

从图 7 可知, 在初始应力为 2 MPa 的低应力条

件下, 围岩振动主要由爆炸荷载引起。随着岩体初始应力的提高, 尽管在一定深度的围岩范围内, 爆炸荷载引起的振动仍要超过开挖荷载瞬态卸荷诱发的振动, 但在围岩深度 5.5 m 以远, 开挖荷载瞬态卸荷诱发的振动已超过爆炸荷载引起的振动。如果岩体初始应力进一步增大(本例中超过 10 MPa), 开挖荷载瞬态卸荷诱发的振动远大于爆炸荷载引起的振动。

从上面的分析可知, 在高地应力条件下, 岩体开挖荷载瞬态卸荷诱发的振动可成为围岩总振动的主要组成部分。

### 3 工程实例

在建的瀑布沟水电站, 装机容量 3 300 MW, 位于四川省。该工程设置了 6 条平行布置的引水隧洞和 2 条尾水隧洞, 其间距分别为 28.9 和 85.0 m。引水洞采用洞径为 10.7 m 的圆形断面, 而尾水洞则为城门洞形, 其断面尺寸为 20.0 m×24.2 m(长×宽)。围岩为波速为 4 500 m/s 以上的花岗岩。

为保证施工过程中施工人员的安全性及相邻隧洞围岩的动力稳定性, 在引水洞和尾水洞开挖中规定, 相邻隧洞爆破开挖至少要错开 50 m。隧洞开挖过程中, 进行了围岩振动的跟踪监测。分别在本洞底板和正对开挖掌子面的邻洞侧壁上沿竖直和径向布置爆破振动传感器, 具体见图 8。

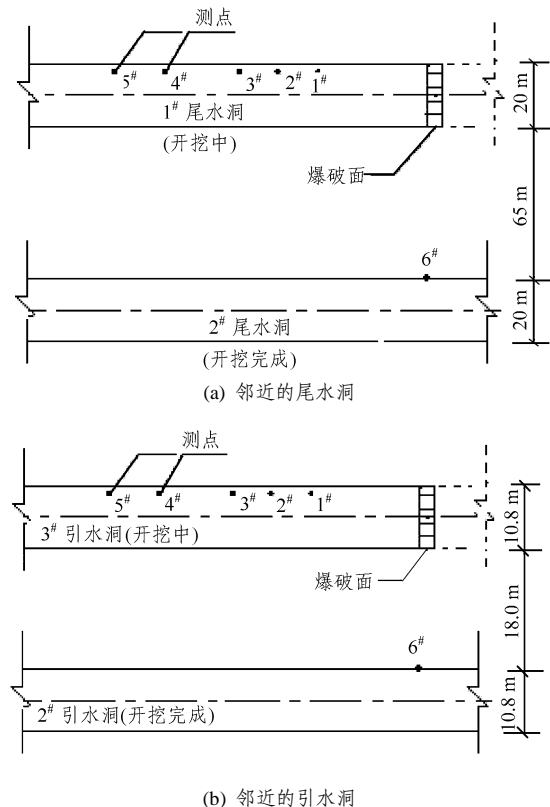


图 8 振动监测测点的布置

Fig.8 Arrangement of vibration monitoring points

### 3.1 尾水隧洞内的实测围岩振动

尾水洞分 3 层开挖, 每层的高度大约为 8 m。上层开挖采用中导洞超前、两侧扩挖跟进的方式。针对 1<sup>#</sup> 尾水洞上层的中导洞开挖, 在 1<sup>#</sup> 引水洞底板及 2<sup>#</sup> 尾水洞正对掌子面的 6<sup>#</sup> 测点部位进行了岩体振动测试。上导洞爆破设计见图 9。在邻洞 6<sup>#</sup> 测点和本洞 5<sup>#</sup> 测点实测的围岩振动曲线分别见图 10(a)和 10(b)。

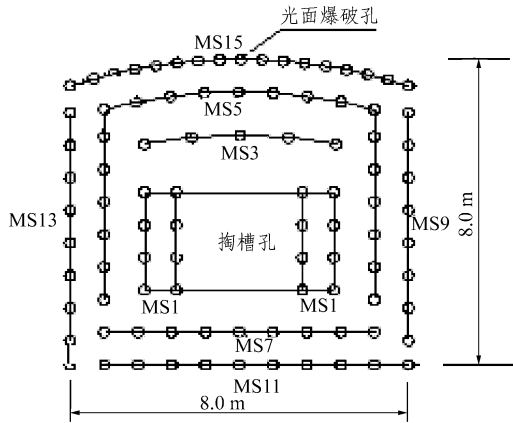


图 9 上导洞开挖爆破设计

Fig.9 Blasting design for excavation of upper leading tunnel

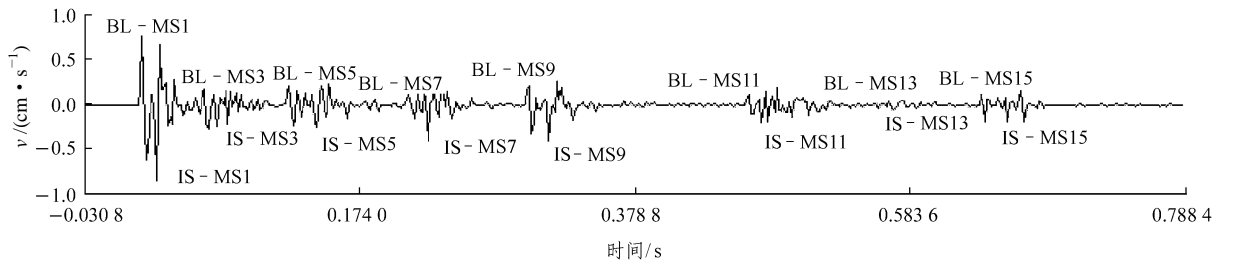
上导洞爆破时, 炮孔直径 42 mm, 孔深 3.5 m, 掏槽孔、崩落孔和光面爆破孔内的药卷直径分别为 35, 32 和 25 mm。由于图 10(b)所示的本洞底板上实测振动时程曲线中包含了 Rayleigh 波, 只针对邻洞 6<sup>#</sup>测点的振动时程曲线进行分析。从图 10(a)可以清楚看到, 每一段振动均是由爆破振动和后续的岩体开挖荷载瞬态卸荷诱发振动叠加而成。

尾水隧洞振动监测洞段的水平向和垂直向围岩初始应力均为 20 MPa。实测爆破振动和开挖荷载瞬态卸荷诱发振动的质点峰值振动速度间的对比见表 3。

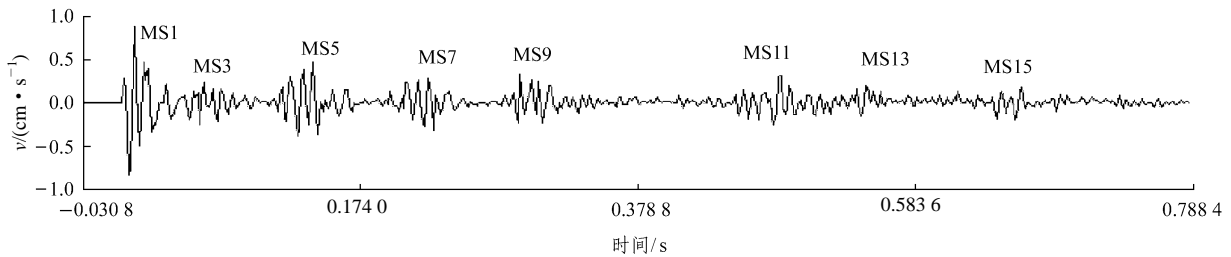
表 3 的结果表明, 在高地应力条件下, 地应力与爆炸荷载处在同一量级, 开挖荷载瞬态卸荷诱发振动与爆破振动大小也存在对应的关系。

### 3.2 引水洞内的实测围岩振动

由于测试洞段的围岩条件较差, 3<sup>#</sup> 引水洞进口段掘进炮孔深度仅为 1.5 m, 总装药量为 48 kg, 分 3 段起爆, 最大单响药量为 20 kg。起爆顺序为掏槽孔、崩落孔和光面爆破孔。在 2<sup>#</sup> 邻洞正对开挖掌子面的 6<sup>#</sup> 测点的实测振动时程曲线见图 11。



(a) 6<sup>#</sup> 测点实测振动曲线



(b) 5<sup>#</sup> 测点实测振动曲线

图 10 尾水洞内的实测围岩振动时程曲线

Fig.10 Monitored vibration curves versus time in tail-water tunnels

表 3 实测爆破振动和开挖荷载瞬态卸荷诱发振动的对比

Table 3 Comparison between vibration induced by blasting and transient unloading of in-situ stress

区域	炮孔类型	雷管段别	爆炸荷载/MPa	开挖荷载/MPa	计算荷载比值	实测振动比值
尾水隧洞	掏槽孔	MS1	21.2	20.0	1.1	0.94
	崩落孔	MS3	14.2	11.0	1.3	1.10
	崩落孔	MS7	14.2	11.0	1.3	0.94
	光面爆破孔	MS15	4.1	4.0	1.0	0.75
引水隧洞	掏槽孔	MS1	21.2	10.0	2.1	1.80
	崩落孔	MS3	24.1	5.6	2.5	1.60
	光面爆破孔	MS5	4.1	2.0	2.0	1.80

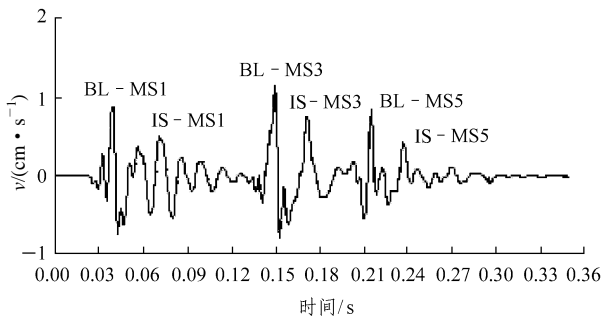


图 11 引水洞内的实测围岩振动时程曲线

Fig.11 Monitored vibration curve versus time in inlet-water tunnels

引水隧洞振动监测洞段的水平向和垂直向围岩初始应力均为 10 MPa, 大概为尾水洞监测洞段的 1/2。爆破振动和开挖荷载瞬态卸荷诱发振动的质点峰值振动速度间的对比也列在表 3 中。从表 3 可知, 爆破振动与开挖荷载瞬态卸荷诱发振动的质点峰值振动速度比值要高于尾水洞内的相应值, 这与引水洞内爆炸荷载与围岩应力比值较大相一致。

#### 4 结论与讨论

通过上面的分析与讨论, 可以获得以下结论:

(1) 在高地应力条件下, 开挖荷载瞬态卸荷诱发的振动是隧洞开挖诱发围岩总振动的重要组成部分。

(2) 爆破振动或开挖卸荷诱发振动均可能成为围岩振动的主要组成部分, 这主要依赖于地应力水平的高低。

(3) 瀑布沟水电站尾水洞和引水洞内的围岩振动实测资料验证了开挖荷载瞬态卸荷诱发振动的存在以及理论分析结论的正确性。

本文的工作仅是开挖卸荷诱发振动问题研究的初步结果, 对开挖荷载瞬态卸荷机制、具体的卸荷方式、卸荷速率对诱发振动的影响, 以及爆破振动与开挖卸荷诱发振动间的分离与识别等重要问题尚需开展深入研究。

#### 参考文献(References):

[1] COOK N G W. Seismicity associated with mining[J]. *Engineering Geology*, 1976, 10(2): 99 - 122.  
 [2] HAZZARD J F, YOUNG R P. Dynamic modeling of induced seismicity[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41(8): 1 365 - 1 376.  
 [3] MCGARR A, TSANG C F, MYER L. Energy budgets of mining-induced earthquakes and their interactions with nearby slopes[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2000, 37(1/2): 437 - 443.  
 [4] TANG C A, KAISER P K. Numerical simulation of cumulative damage and seismic energy release during brittle rock failure—part I:

fundamentals[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1998, 35(2): 113 - 121.  
 [5] KAISER P K, TANG C A. Numerical simulation of damage accumulation and seismic energy release during brittle rock failure—part II: rib pillar collapse[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1998, 35(2): 123 - 134.  
 [6] 徐则民, 吴培关, 王苏达, 等. 岩爆过程释放的能量分析[J]. *自然灾害学报*, 2003, 12(3): 104 - 110.(XU Zemin, WU Peiguan, WANG Suda, et al. Analysis of energy released in process of rock-burst[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2003, 12(3): 104 - 110.(in Chinese))  
 [7] COOK M A, COOK U D, CLAY R B, et al. Behavior of rock during blasting[J]. *Transaction of Social Mining Engineering*, 1966, (1): 17 - 25.  
 [8] ABUOV M G, AITALIEV S M, ERMEKOV T M, et al. Studies of the effect of dynamic processes during explosive break-out upon the roof of mining excavations[J]. *Journal of Mining Science*, 1988, 24(6): 581 - 590.  
 [9] CARTER J P, BOOKER J R. Sudden excavation of a long circular tunnel in elastic ground[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1990, 27(2): 129 - 132.  
 [10] 卢文波, 金 李, 陈 明, 等. 节理岩体爆破开挖过程的瞬态卸荷松动机制研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(增 1): 4 653 - 4 657. (LU Wenbo, JIN Li, CHEN Ming, et al. Study on the mechanism of the loosening of the jointed rock mass caused by the dynamic unloading of initial stress during rock blasting[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(Supp.1): 4 653 - 4 657.(in Chinese))  
 [11] 易长平, 卢文波, 许红涛, 等. 岩体开挖过程初始应力的瞬态卸荷效应研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(增 1): 4 750 - 4 754.(YI Changping, LU Wenbo, XU Hongtao, et al. The dynamic unloading effect study of initial stress field in excavation process of large-scale rock mass structure[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(Supp.1): 4 750 - 4 754.(in Chinese))  
 [12] HENRYCH J. 爆炸动力学及其应用[M]. 熊建国译. 北京: 科学出版社, 1987: 183 - 190.(HENRYCH J. *The dynamics of explosion and its application*[M]. Translated by XIONG Jianguo. Beijing: Science Press, 1987: 183 - 190.(in Chinese))  
 [13] 李 清, 杨仁树, 李均雷, 等. 爆炸荷载作用下动态裂纹扩展试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(16): 2 912 - 2 916.(LI Qing, YANG Renshu, LI Junlei, et al. Experimental study on propagation of dynamic cracks under blasting loading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(16): 2 912 - 2 916.(in Chinese))  
 [14] 陈静曦. 裂纹扩展速度监测分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 1998, 17(4): 425 - 428.(CHEN Jingxi. Monitoring analysis for the velocity of crack propagation[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1998, 17(4): 425 - 428.(in Chinese))  
 [15] 席道瑛, 钟时杰, 黄理兴. 岩石裂纹扩展速度的研究与地震过程初探[J]. *岩土力学*, 1994, 15(3): 51 - 58.(XI Daoying, ZHONG Shijie, HUANG Lixing. Study on growth speed of rock crack and inquiry of earthquake process[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1994, 15(3): 51 - 58.(in Chinese))